

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei
Abstract of PhD Thesis

A szilícium alapú fotoelektron-sokszorozó korrelált zajainak analízise és letörési feszültségeloszlásának mérése, modellezése

Correlated noise analysis and breakdown voltage distribution measurement, modelling of silicon photomultipliers

Nagy Ferenc

Témavezető / Supervisor
Dr. Molnár József



Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

University of Debrecen
PhD School in Physics

Debrecen, 2017

Készült
a Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Magfizika programja keretében
az MTA Atommagkutató Intézetben

Prepared at
the University of Debrecen
PhD School in Physics,
and the Institute for Nuclear Research,
Hungarian Academy of Sciences

1. Bevezetés

A 80-as évek végén Golovin és Sadygov által javasolt pixelizált Geiger-módban működő lavina fotodiódák, más néven a szilícium alapú fotoelektron-sokszorozók (silicon photomultiplier, SiPM), számos olyan tulajdonsággal bírnak, amelyek alkalmassá teszik őket a részecskefizikai, magfizikai, nukleáris képalkotó és asztrofizikai detektorokban való alkalmazásra. A SiPM-eket a nagy erősítésük és egy-foton (single photon) detektálási képességük miatt a fotoelektron-sokszorozó csövek (photomultiplier tube, PMT) egyik lehetséges helyettesítőjének tekintik. A nagy erősítésük mellett számos előnnyel bírnak: jó időfeloldás, alacsony üzemi feszültség, mechanikai robusztusság, kis méret és a mágneses térrel szembeni érzéketlenség. A számos előny mellett a SiPM jelentős hátránya a magas zaja (sötétimpulzusok, utóimpulzusok, késleltetett-áthallás).

Habár a SiPM működési elve egyszerű, működésének teljes megértéséhez számos fizikai folyamatot és gyártástechnológiai részletet figyelembe kell venni. Ez a mélyebb megértés nélkülözhetetlen egy SiPM-et alkalmazó detektor/detektorrendszer tervezésénél, építésénél. Értekezésemben, a fentebb említett megértési folyamatba kapcsolódva, két főbb területtel foglalkoztam:

- A SiPM korrelált-zajainak analízise
- A SiPM letörési karakterisztikájának egyenáramú analízise

A SiPM korrelált-zajainak az analízisének különös figyelmet fordítottam az utóimpulzus (afterpulse, AP) és a késleltetett-áthallás (delayed crosstalk, CT-D) diszkriminációjára, a jelhez adott járulékok számszerűsítésére. Habár ezek a zajok is jelentősen korlátozzák a szenzor egy-foton feloldását és a dinamikai tartományát, az irodalomban eddig nem jelent meg velük kapcsolatos részletes tanulmány. Ezért ezen zajok diszkriminációjához dolgoztam ki egy az impulzusok érkezési ideje és amplitúdójának mérésén alapuló módszert.

A SiPM-ek karakterizálására és válogatására két széles körben használt módszer van: fotoelektron-spektrumon (single photon spectrum, SPS) és áram-feszültség görbén alapuló módszer. Az első megközelítés

bonyolult és időigényes, míg a második egy egyszerű egyenáramú (DC) mérés, ami sokkal gyorsabb. Ezért tömeges SiPM-válogatás esetén, ami több ezer/tízezer szenzort is jelenthet, a második módszer a kézenfekvő. A fotoelektron-spektrum alapú mérés egy további korlátja az, hogy érzékeny a sötétimpulzusok gyakoriságára. Például besugárzott (gamma, neutron, proton) SiPM-ek sötétimpulzusainak gyakorisága annyira megnőhet, hogy a fotoelektron-spektrumban a fotoelektron-csúcsok elmosódnak, átfedésbe kerülnek, és így megkülönböztethetlenné válnak. Az ilyen megnövekedett sötétáramú szenzorok karakterizálása csak az áram-feszültség görbe alapján történhet.

2. Célkitűzések

2.1 A SiPM korrelált-zajainak analízisével kapcsolatos célkitűzések

- Új módszer kidolgozása az utóimpulzus és a késleltetett-áthallás diszkriminációjára, amivel a késleltetett-áthallás léte közvetlen igazolható.
- Az utóimpulzus és a késleltetett-áthallás SiPM jeléhez adott járulékának számszerűsítése.
- Az utóimpulzus és a késleltetett-áthallás kapcsolatának vizsgálata a szubsztrátban történő töltéshordozó-diffúzióval.

2.2 A SiPM letörési feszültségének analízisével kapcsolatos célkitűzések

- Olyan analitikus modell megalkotása, ami jól leírja a SiPM áram-feszültség görbéjének a letörési feszültség körüli tartományát.
- A modell alapján egy olyan DC-módszer kidolgozása, ami alapján pontosan meghatározható a SiPM letörési feszültsége.
- Az általam javasolt módszer összevetése a már ismert DC-módszerekkel.

3. Anyagok és módszerek

3.1 A SiPM korrelált-zajainak analízise

A zaj-analízissel kapcsolatos méréseket egy Marie Curie ösztöndíj (PicoSEC) keretein belül, a cataniai STMicroelectronics laboratóriumában, az ottani eszközökkel végeztem el. A SiPM-et kis intenzitású, 405 nm hullámhosszúságú lézerimpulzus sorozattal világítottam meg. A lézerimpulzusok időbeli szélessége 20 ps volt és impulzusonként átlagosan 2-3 fotont tartalmaztak. Minden egyes impulzusnál a SiPM jelét egy digitális oszcilloszkóppal rögzítettem 2 GHz-es mintavételezési frekvenciával. Az adatgyűjtésre és a rögzített hullámformák digitális feldolgozására egy saját fejlesztésű C++ programot használtam. A hullámformában megjelenő korrelált impulzusok szeparálását, beleértve az utóimpulzus és a késleltetett-áthallás szeparálását is, amplitúdójuk és érkezési idejük alapján végeztem.

Az utóimpulzus és a késleltetett áthallás analízisét STMicroelectronics által gyártott 1x1 mm²-es, 100 mikrocellából álló SiPM-eken hajtottam végre. A SiPM-ek mikrocella mérete 100 μm és a kitöltési tényezője 67% volt. A szenzorok mikrocellái N-on-P technológiával készültek. A mérés során 3 V-os túlfeszültséget alkalmaztam az éppen mérendő eszközön.

Az utóimpulzus/késleltetett-áthallás és a szubsztrátban történő töltéshordozó-diffúzió közötti kapcsolat vizsgálatához három különböző szubsztráttal megvalósított SiPM típust használtam. A p-típusú szubsztrátok 3.5×10^{18} , 6.0×10^{18} és 1.5×10^{19} 1/cm³ koncentrációjú bór-szennyezést tartalmaztak. Ezek a SiPM típusok a szubsztrát szennyezésén kívül minden más paraméterben megegyeztek a fentebb leírt típussal.

3.2 A SiPM letörési karakterisztikájának egyenáramú analízise

A letörési feszültséggel kapcsolatos egyenáramú méréseket az MTA Atommagkutató Intézetében végeztem el. SiPM-ek egyenáramú mérésére alkalmas rendszert építettünk, egy multiplexálható mintatartó

mátrix-al és egy pozícionálható 490 nm hullámhosszúságú fényforrással, ami egy feltöltéssel 64 db SiPM automatizált leérésére alkalmas. Az áram-feszültség görbéket egy Keithley SourceMeter-rel vettem fel. A görbék mérési pontjai közötti lépésköz 0,05 V volt. A multiplexer és pozícionáló vezérlését, valamint az adatgyűjtést egy általam fejlesztett Java alapú Processing programmal valósítottam meg. A leért áram-feszültség adatokból, SiPM-enként, meghatároztuk a letörési feszültséget az irodalomból már ismert DC-módszerekkel és az általam bevezetett 3. derivált módszerrel egyaránt. A különböző módszerek eredményeit összevettem pontosság (accuracy), precizitás (precision) és áram-ofszetre való érzékenység szempontjából.

A méréseket olyan 3x3 mm²-es, Hamamatsu által gyártott, MPPC S12572-015P típusú SiPM-eken végeztem el, amelyeknek P-on-N rétegrendje és 40000 mikrocellája van.

4. Eredmények

4.1 A SiPM korrelált-zajainak analízise

A korrelált-zajok diszkriminációjával kapcsolatban elért főbb eredményeim:

1. Új módszer fejlesztettem ki a késleltetett-áthallás és az utóimpulzus szeparálására a korrelált zajimpulzusok érkezési ideje és amplitúdója alapján.
2. A módszer alapján meghatározható, külön-külön, a késleltetett-áthallás és az utóimpulzus valószínűsége, jelhez adott járuléka, továbbá karakterisztikus ideje.
3. Bizonyítottam a késleltetett-áthallás jelenlétét. A méréseim alapján kiderült, hogy a késleltetett-áthallás jelentős arányban, mintegy 13 %-ban van jelen a SiPM jelében.

STMicroelectronics-nál gyártott, három különböző szennyezés-koncentrációjú szubsztráttal készült SiPM-et vizsgáltam meg a késleltetett-áthallás és az utóimpulzus szempontjából. A három féle SiPM rétegszerkezetében az egyetlen különbség csak a szubsztrát

szennyezésében volt, a rétegszerkezetük felső tartománya teljesen megegyezett. Ennek ellenére megfigyeltem, hogy az utóimpulzus függ a szennyezés-koncentrációtól. Ez meglepő, ha ennek a korrelált impulzusnak az irodalomban eddig leírt eredetére gondolunk. A szakirodalom az utóimpulzust a rétegszerkezet legfelső részén lévő kiürített tartományban becsapdázódott és később kiszabaduló töltéshordozóknak tulajdonítja, vagyis eredetét a rétegszerkezet legfelső tartományára lokalizálja. Tehát az, hogy az utóimpulzusra hatást gyakorol a szubsztrát szennyezése, arra utal, hogy eredete nem lokalizálható csupán erre a felső tartományra. Továbbá a késleltetett-áthallás és utóimpulzus karakterisztikus idők értékei közötti hasonlóság és a valószínűségeik korrelált függése a szubsztrát szennyezés-koncentrációjától arra enged következtetni, hogy a késleltetett-áthallás és az utóimpulzusok jelentős részéért is ugyanaz a fizikai folyamat, a töltéshordozó-diffúzió felelős. Ezzel kapcsolatban elért főbb eredményeim:

4. Kimutattam, hogy az utóimpulzus valószínűsége függ a SiPM szubsztrátjának szennyezés-koncentrációtól.
5. Kimutattam a késleltetett-áthallás és az utóimpulzus
 - a. valószínűsége közötti korrelációt.
 - b. valószínűsége közötti korrelációt.
6. A 4. és az 5. pontok alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a diffúzió-vezérelt utóimpulzusoknak az eddigi feltételezettnél jóval nagyobb szerepe van.

4.2 A SiPM letörési karakterisztikájának egyenáramú analízise

Az irodalomból eddig ismert DC-módszerek egyrészt heurisztikusak, másrészt azon az egyszerű feltevésen alapulnak, hogy egy SiPM-en belül egyetlen fajta és egyetlen értékű letörési feszültség van. Emiatt egy adott SiPM az etalonnak tekintett fotoelektron-spektrumból és egy hagyományos DC-módszerrel meghatározott letörési feszültségértékei eltérőek lesznek. További hátránya az eddigi módszereknek, hogy legtöbbjük érzékeny az

áram-feszültség görbében megjelenő ofszetre, valamint némelyiknél az illesztési tartomány meghatározása nem egyértelmű.

A dolgozatban bemutatam egy az előbb felsorolt hiányosságoktól mentes, a SiPM áram-feszültség görbáját leíró modellt, amely figyelembe veszi a SiPM mikrocelláinak hiszterézisét (különböző begyújtási és kioltási feszültségek), továbbá a mikrocellák begyújtási feszültségeinek eloszlását. A modell alapján kidolgoztam egy új DC-módszert, az ún. 3. derivált módszert, ami képes a SiPM kétféle letörési feszültségét és a begyújtási feszültség-eloszlást az áram-feszültség görbából meghatározni. Fontosabb eredményeim ezzel kapcsolatban:

7. Bevezettem egy SiPM áram-feszültség modellt, ami magyarázatot ad a fotoelektron-spektrum és a DC-mérésből kapott letörési feszültségek különbözőségére.
8. A modell alapján megmutattam, hogy a SiPM áram-feszültség görbéjének harmadik deriváltja visszaadja a SiPM begyújtási, kioltási feszültségeket és a mikrocellák begyújtási feszültség eloszlását (3. derivált módszer).
9. A begyújtási feszültség eloszlásának súlypontja kapcsolatban van a hagyományos DC-módszerekkel meghatározott letörési feszültséggel.
10. A megvilágított SiPM áram-feszültség görbéjéből kapott kioltási feszültségek átlaga azonos a fotoelektron-spektrumból kapott letörési feszültséggel.
11. A 3. deriváltból kapott letörési feszültség értékek precizitása (precision) hasonlóan adódott a többi DC-módszeréhez, viszont a pontosság (accuracy) csupán a 3. derivált módszer esetén volt elfogadható.
12. A bevezetett 3. derivált módszer nem érzékeny még a nagy áram-ofszetekre sem, az illesztési tartománya is egyértelmű, így jól alkalmazható ionizáló sugárzással erősen terhelt SiPM-ek sötétben történő mérésére.

5. Kitekintés

A SiPM lehetséges alkalmazásterületein jellemző a szenzorokat érő, jelentős mértékű sugárterhelés. Ezért fontos tudni, hogy miképpen reagálnak a SiPM-ek a különböző típusú sugárzásokra (gamma, proton, neutron) és milyen mértékű dózist képesek elviselni.

A letörési feszültség vizsgálataival párhuzamosan gammával és neutronnal történő besugárzásos méréseket is elkezdtem. Ezekben a mérésekben két paramétert, a sötétáramot és a letörési feszültséget mérjük a besugárzás előtt, alatt és után. A letörési feszültség meghatározásához, az értekezésemben ismertetett 3. derivált módszert használok.

A közeljövőben további besugárzásos méréseket tervezünk elvégezni, ezzel is tovább bővítve a SiPM működésének megértéséhez szükséges ismereteket. A célkitűzéseimet a következő néhány pontban összegzem:

- Gamma-sugárzás hatása a SiPM sötétáramára és letörési feszültségére
- Neutron-sugárzás hatása a SiPM sötétáramára és letörési feszültségére
- Gamma- és neutron-sugárkárosodás hatásainak összevetése (sokszorozódó/nem sokszorozódó sötétáram, letörési feszültség változás)
- Gamma és neutron által sugárkárosodott SiPM-ek helyreállása
- A dózis rate hatása a SiPM károsodására és helyreállítására

1. Introduction

The pixelated Geiger-mode avalanche photodiode or silicon photomultiplier (SiPM) was proposed by Golovin and Sadygov in the late '80s. This type of sensor is a promising candidate for applications in the field of high energy physics, nuclear physics, nuclear imaging and astrophysics. Due to their high gain and single photon detection capability SiPMs are considered as a possible substitution of photomultiplier tubes (PMT). Beside the high gain SiPMs have several advantages such as good timing, low operation voltage, mechanical robustness, small size and high magnetic field tolerance. In spite of these advantages SiPMs have a great drawback: their high noise (dark pulses, afterpulse, delayed crosstalk). However, as technology is improving the noise of SiPMs on the market is getting lower.

Although the working principle of SiPMs is simple, to understand its operation several underlying physical phenomena and details of its production process are necessary to be considered. This deeper understanding is indispensable when designing and constructing a detector or detector system with SiPMs. In line with this understanding process, I paid attention to the following two areas:

- Analysis of the SiPM's correlated noises
- DC analysis of the SiPM's breakdown characteristics

In the analysis of correlated noises, I focused on the discrimination of afterpulse and delayed crosstalk, and the quantitative determination of their contribution to the SiPM signal. Although these noises significantly limit the single photon detection capability and dynamic range of a sensor, so far no detailed study on that topic has been published in the literature. Therefore in my thesis I propose a new method for the discrimination of these noises based on the arrival time and amplitude of the pulses.

For the characterization and selection of SiPMs, there are two widely used methods: one based on the single photon spectrum (SPS) and the other based on the current-voltage curve. The first approach is complex and time consuming, while the second one is a simple DC

measurement, which is much faster. Therefore the second approach is more efficient for the selection of a large number (several thousands) of SiPMs. A further limitation of the single photon spectrum method is its sensitivity to the dark pulse rate. For instance, the dark pulse rate of irradiated SiPMs may increase so much that the peaks in the single photon spectrum would smear and get overlapped, and thus become indistinguishable. The only way to characterize these irradiated devices is by their current-voltage curves.

2. Aims

2.1 Aims related to the analysis of the SiPM's correlated noises

- To develop a new method to discriminate afterpulse and delayed crosstalk and to directly prove the presence of delayed crosstalk
- To quantitatively determine afterpulse and delayed crosstalk contributions to the SiPM signal
- To investigate the relation of afterpulse and delayed crosstalk noises with the carrier diffusion in the substrate

2.2 Aims related to the DC analysis of the SiPM's breakdown characteristics

- To construct a new analytical model that properly describes the region around the breakdown voltage in the SiPM's current-voltage curve
- To develop a new DC method, based on the new model, that accurately determines the SiPM's breakdown voltage
- To compare the proposed method and other already known DC methods

3. Materials and methods

3.1 Analysis of the SiPM's correlated noises

The analysis of correlated noises was done within a Marie Curie project (PicoSEC) at STMicroelectronics, Catania on sensors produced by the company. The SiPM was exposed with a series of 405-nm laser pulses. The laser pulse width was 20 ps and consisted of 2-3 photons on average. For each pulse, the SiPM signal was recorded with a digital oscilloscope at 2 GHz sampling rate. I used a custom-made C++ software for data acquisition and digital processing of the recorded waveforms. The correlated pulses, including the afterpulses and delayed crosstalk, were sorted by their amplitudes and arrival times.

The afterpulse and delayed crosstalk analysis were performed on STMicroelectronics 1 mm² SiPMs with 10 by 10 microcells, 100 μ m pitch and 67% fill factor. The microcells of the device were fabricated in N-on-P technology. An overvoltage of 3 V was applied on the SiPM during the measurements.

To investigate the relation of afterpulse and delayed crosstalk noises with the carrier diffusion in the substrate, three SiPM types with different substrates were used. The p-type substrates were doped with boron with concentrations of 3.5×10^{18} , 6.0×10^{18} and 1.5×10^{19} 1/cm³. These SiPM types, apart from the substrate doping concentrations, were identical with the SiPM type described above.

3.2 DC analysis of the SiPM's breakdown characteristics

The DC measurements related to the breakdown voltage analysis were performed at the Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of Sciences. An automated system with multiplexed sample holder and positionable 490-nm light source was constructed to perform DC measurements on SiPMs. The system can measure 64 pcs of SiPMs with a single loading.

The current-voltage curves were registered by a Keithley SourceMeter. The step size between two measured points was 0.05 V. A custom-made Java based Processing software was applied to control the

multiplexer with the positioning stage and to acquire data. Using five of the known DC methods and the proposed 3rd derivative method, the breakdown voltage was determined from the measured current-voltage curves for each SiPM. The methods were compared based on accuracy, precision and their sensitivity to current offset.

The measurements were performed on 3x3 mm², 40k-microcell, P-on-N-type MPPC S12572-015P sensors produced by Hamamatsu.

4. Results

4.1 Analysis of the SiPM's correlated noises

My main results related to the discrimination of the correlated noises are the following:

1. I developed a new method for the discrimination of delayed crosstalk and afterpulse based on the arrival time and amplitude of the pulses.
2. Using my method, the probabilities and characteristic times of delayed crosstalk and afterpulses as well as their contributions to the signal were determined separately.
3. I proved the presence of delayed crosstalk. According to my measurements its contribution to the signal of the tested SiPM is significant, about 13%.

Three SiPMs, produced by STMicroelectronics and fabricated with substrates of different doping concentrations were investigated for afterpulse and delayed crosstalk. The only difference between the layer structures of the three different SiPMs was in the doping concentrations of the substrates. The upper region of the layer structure was identical for all the SiPMs. Despite of this, a dependency of afterpulse on doping concentration was observed. This is surprising considering its origin suggested by the literature: the afterpulse is related to the carriers trapped and later released in the depleted region located in the upper part of the layer structure, that is, its origin is limited to the upper part of the layer

structure. In contrast, the measured dependency of afterpulse on doping concentration suggests that its origin is not limited to this upper region. Furthermore, the similarity of delayed crosstalk and afterpulse characteristic times and the correlation between their probabilities as a function of doping concentration suggests that the same physical phenomenon is responsible for delayed crosstalk and a major part of afterpulses: the carrier diffusion. My main results here are the following:

4. I demonstrated the dependency of afterpulse on the substrate doping concentration.
5. I demonstrated that for the delayed crosstalk and the afterpulse:
 - a. their probabilities are correlated.
 - b. their characteristic times are correlated.
6. Points 4 and 5 infer that the diffusion-assisted afterpulse plays a much more important role than the one supposed so far.

4.2 DC analysis of the SiPM's breakdown characteristics

The known DC methods from the literature are heuristic and based on the simple assumption that an SiPM has only one kind of breakdown voltage with a single value. Because of this, the values of breakdown voltages from a DC and from an single photon spectrum measurement will differ. A further drawback of the known methods is that most of them are sensitive to the offset appearing in the current-voltage curve and for some of them the fitting range is ambiguous.

In this work, I proposed a new current-voltage model of SiPM that is more comprehensive, free from the mentioned disadvantages and takes into account the hysteresis of the SiPM's microcells (different turn-on and turn-off voltages) as well as the distribution of turn-on voltages. Based on the model, a DC method, the so called 3rd derivative method was proposed. From a current-voltage curve this method is capable of determining two breakdown voltages of an SiPM and the turn-on voltage distribution over the microcell population. My main results related to this are the following:

7. I introduced an SiPM current-voltage model that explains the difference between the breakdown voltages derived from single photon spectrum and DC measurements.
8. The model infers that the 3rd derivative of the SiPM current-voltage curve yields the turn-on and turn-off voltages of the SiPM and the turn-on voltage distribution over the SiPM's microcell population (3rd derivative method).
9. The mean of the turn-on voltage distribution is related to the breakdown voltage derived from the traditional DC methods.
10. The mean of turning-off voltages derived from the illuminated SiPM's current-voltage curve is equivalent with the breakdown voltage derived from the single photon spectrum.
11. While the precision of the breakdown voltage value from the 3rd derivative and from the other DC methods are similar, the accuracy was only acceptable for the 3rd derivative method.
12. The 3rd derivative method is insensitive even to a large current offset and its fitting range is unambiguous, thus it is an adequate method to characterize SiPMs heavily irradiated by ionizing radiation even in dark condition.

5. Perspectives

In the potential application fields of SiPMs, the presence of heavy irradiation is expected. Therefore it is crucial to know the response of SiPMs to various types of radiations (gamma, proton, neutron) and the amount of dose that they can still tolerate.

During the breakdown voltage analysis, I started measurements on SiPM with gamma and neutron irradiation. In these measurements two parameters, dark current and breakdown voltage were determined before, during and after irradiation. The proposed method in the PhD thesis, the 3rd derivative method was used to determine the breakdown voltage.

In the near future I am planning to perform further irradiation tests to extend the knowledge necessary to understand the working of SiPMs. My aims here are the following:

- To study the effect of gamma irradiation on the SiPM's dark current and breakdown voltage
- To study the effect of neutron irradiation on the SiPM's dark current and breakdown voltage
- To compare the damage caused by gamma and neutron irradiation (multiplying/non-multiplying dark current, breakdown voltage change)
- To study the recovery of SiPMs after gamma and neutron radiation damage
- To study the effect of dose rate on damage and recovery of SiPMs

6. Az értekezéshez kapcsolódó publikációk / Publications related to the thesis

- p1.** F. Nagy, M. Mazzillo, L. Renna, G. Valvo, D. Sanfilippo, B. Carbone, A. Piana, G. Fallica, and J. Molnár, “Afterpulse and delayed crosstalk analysis on a STMicroelectronics silicon photomultiplier,” Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 759, pp. 44–49, 2014. **(IF: 1.216²⁰¹⁴)**
- p2.** M. Mazzillo, F. Nagy, D. Sanfilippo, G. Valvo, B. Carbone, A. Piana, G. Fallica, and S. Coffa, “Silicon photomultipliers development at STMicroelectronics,” in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2013, vol. 8773, p. 877302. **(IF: 0.460²⁰¹³)**
- p3.** F. Nagy, G. Hegyesi, G. Kalinka, and J. Molnar, “A model based DC analysis of SiPM breakdown voltages,” Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 849, pp. 55–59, 2017. **(IF: 1.030²⁰¹⁶)**
- p4.** M. Mazzillo, F. Nagy, D. Sanfilippo, G. Valvo, B. Carbone, A. Piana, and G. Fallica, “Silicon photomultiplier technology for low-light intensity detection,” in IEEE SENSORS 2013 - Proceedings, 2013. **(IF: 0.000)**
- p5.** F. Nagy, G. Hegyesi, I. Valastyán, and J. Molnár, “Monte Carlo simulations of silicon photomultiplier output signal,” Acta Phys. Debrecina, vol. 45, no. 1, p. 125, 2011. **(IF: 0.000)**

7. Az értekezéshez kapcsolódó előadások / Talks related to the thesis

- p6.** F. Nagy, “Delayed Crosstalk and Afterpulsing Evaluation in Silicon Photomultipliers”, talk at the 3rd European Nuclear Physics Conference (EuNPC 2015), Groningen, The Netherlands, Aug. 31 - Sept. 4, 2015.

8. Egyéb publikációk / Other publications

- p7.** A. K. Krizsan, I. Lajtos, M. Dahlbom, F. Daver, M. Emri, S. a Kis, G. Opposits, L. Pohubi, N. Potari, G. Hegyesi, G. Kalinka, J. Gal, J. Imrek, F. Nagy, I. Valastyan, B. Kiraly, J. Molnar, D. Sanfilippo, and L. Balkay, “A Promising Future: Comparable Imaging Capability of MRI-Compatible Silicon Photomultiplier and Conventional Photosensor Preclinical PET Systems,” *J. Nucl. Med.*, vol. 56, no. 12, pp. 1948–1953, Dec. 2015. **(IF: 5.849²⁰¹⁵)**
- p8.** I. Lajtos, M. Emri, S. a. Kis, G. Opposits, N. Potari, B. Kiraly, F. Nagy, L. Tron, and L. Balkay, “Performance evaluation and optimization of the MiniPET-II scanner,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 707, pp. 26–34, 2013. **(IF: 1.316²⁰¹³)**
- p9.** F. Nagy, G. Hegyesi, I. Valastyán, J. Imrek, B. Király, and J. Molnár, “Hardware accelerated UDP/IP module for high speed data acquisition in nuclear detector systems,” in *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2012, pp. 810–813. **(IF: 0.000)**
- p10.** F. Nagy, J. Imrek, G. Hegyesi, I. Valastyan, and J. Molnar, “An improved time synchronization algorithm on 1000BASE-T Ethernet,” in *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2012, pp. 1112–1114. **(IF: 0.000)**
- p11.** G. Hegyesi, G. Kalinka, J. Molnár, F. Nagy, J. Imrek, and Z. Szabó, “FPGA based TDC using Virtex-4 ISERDES blocks,” in *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2010, pp. 1413–1415. **(IF: 0.000)**
- p12.** J. Imrek, G. Hegyesi, G. Kalinka, B. Király, J. Molnár, F. Nagy, I. Valastyán, L. Balkay, and Z. Szabo, “Evaluation detector module of the miniPET-3 small animal PET scanner,” in *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2012, pp. 3790–3793. **(IF: 0.000)**
- p13.** I. Valastyan, J. Gal, G. Hegyesi, G. Kalinka, F. Nagy, B. Kiraly, J. Imrek, J. Molnar, M. Colarieti-Tosti, Z. Szabo, and L. Balkay, “Novel time over threshold based readout method for MRI compatible small animal PET detector,” in *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2012, pp. 1295–1299. **(IF: 0.000)**
- p14.** J. Imrek, G. Hegyesi, G. Kalinka, J. Molnar, and F. Nagy, “Clock distribution and synchronization over 1000BASE-T Ethernet,” in *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2010, pp. 2726–2728. **(IF: 0.000)**
- p15.** J. Gál, J. Imrek, G. Kalinka, B. Király, F. Nagy, B. M. Nyakó, J. Molnár, I. Valastyán, L. Balkay, and S. a. Kis, “On the fundamental limits of the position resolution of position-sensitive scintillation detector using continuous crystal,” in *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2012, pp. 3684–3689. **(IF: 0.000)**